

# Псевдоморфные транзисторные гетероструктуры на основе GaAs с цифровыми барьерами

С.А. Богданов, С.Н. Карпов, А.Б. Пашковский, Е.В. Терешкин

Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «ИСТОК» имени А.И. Шокина»

**Аннотация:** приведены результаты теоретических исследований характеристик псевдоморфных транзисторных гетероструктур различных конфигураций на основе GaAs с двухсторонним донорно-акцепторным легированием и системами чередующихся тонких слоев AlAs/GaAs, образующих дополнительные цифровые потенциальные барьеры. Показано, что использование цифровых барьеров в совокупности с донорно-акцепторным легированием позволяет как минимум в 2 раза увеличить рабочие частоты и соответственно в 4 раза коэффициент усиления относительно значений характерных для обычных DpHEMT-транзисторов при сохранении неизменными высоких значений других параметров, например, удельной мощности.

**Ключевые слова:** GaAs-гетероструктура, DA-DpHEMT, Q-DpHEMT, Q-iHEMT, Q-DCpHEMT, цифровые барьеры

## 1. Введение

Активное продвижение мощных полупроводниковых приборов в миллиметровый диапазон длин волн связано, в основном, с совершенствованием эпитаксиальных технологий нитрида галлия. В миллиметровом диапазоне длин волн полевые транзисторы на основе AlGa<sub>N</sub> – GaN гетероструктур демонстрируют крайне впечатляющие характеристики и продвинулись почти до терагерц. В то же время, одним из основных недостатков мощных нитридгаллиевых приборов являются высокий уровень нелинейности, и он до сих пор не устранён. Промышленное применение таких приборов на частотах заметно выше 100 ГГц выглядит пока достаточно проблематичным. Кроме того, существует высокая вероятность того, что типовые транзисторы на гетероструктурах на основе GaN без появления принципиально новых технических решений достигли своего максимума в предельных частотах. В свою очередь, при проектировании транзисторов на основе GaAs псевдоморфных гетероструктур имеются возможности существенного улучшения их характеристик - увеличения удельной выходной мощности, коэффициента усиления и предельных частот.

В России в 2012 г. был создан новый тип транзисторных гетероструктур: гетероструктуры с донорно – акцепторным легированием (DA-DpHEMT) [1-4]. Донорно-акцепторное легирование позволило сформировать у границ квантовой ямы дополнительные потенциальные барьеры, оптимизированные для уменьшения поперечного пространственного переноса электронов и увеличения эффекта размерного квантования. Первые результаты разработки мощных полевых транзисторов на GaAs гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием продемонстрировали двукратное увеличение удельной мощности транзисторов, а также рост малосигнального коэффициента усиления на 3 – 4 дБ [3].

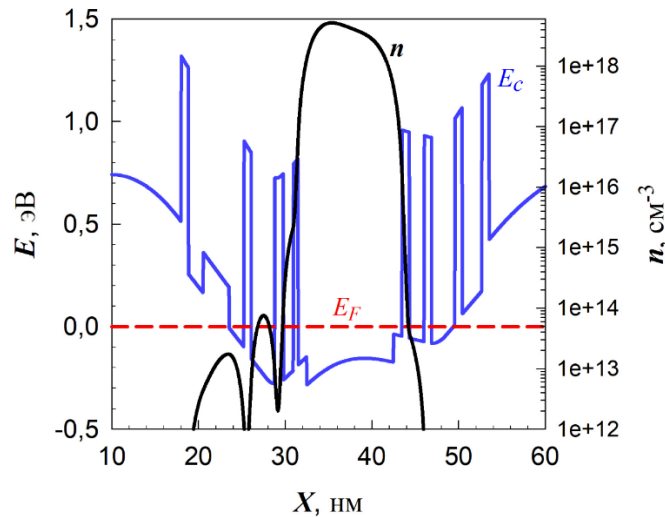
В 2020 году транспортные свойства псевдоморфных AlGaAs/GaAs/InGaAs гетероструктур с двухсторонним донорно – акцепторным легированием DA-DpHEMT были существенно улучшены за счет введения дополнительных цифровых потенциальных барьеров из AlAs/GaAs короткопериодных сверхрешеток вокруг легированных областей.

В работе приведены результаты теоретических исследований применения цифровых барьеров для улучшения характеристик GaAs псевдоморфных транзисторных гетероструктур.

Расчеты производились по модели, представленной в [5] для следующих гетероструктур: с двухсторонним донорно-акцепторным легированием и системами чередующихся тонких слоев AlAs/GaAs, образующих дополнительные цифровые потенциальные барьеры; обращенных гетероструктур с донорно-акцепторным легированием и дополнительными цифровыми потенциальными барьерами; двухканальных гетероструктур с донорно – акцепторным легированием и дополнительными цифровыми потенциальными барьерами.

## 2. Гетероструктура с донорно-акцепторным легированием и дополнительными цифровыми потенциальными барьерами

Разработаны и апробированы GaAs транзисторы на основе псевдоморфных гетероструктур с двухсторонним донорно-акцепторным легированием и системами чередующихся тонких слоев AlAs/GaAs, образующих дополнительные цифровые потенциальные барьеры. Зонная диаграмма, положение уровня Ферми и концентрационный профиль такой структуры приведен на рисунке 1. Установлено, что введение цифровых барьеров на 30 – 40 % повышает всплеск дрейфовой скорости электронов при влёте их в область сильного поля [6, 7], а ряд дополнительно проявившихся квантовых эффектов, связанных с локализацией горячих электронов в сверхрешётке, позволил назвать гетероструктуру с донорно – акцепторным легированием и дополнительными потенциальными барьерами из AlAs/GaAs сверхрешеток квантовой (Q-DpHEMT). Q-DpHEMT транзисторы продемонстрировали увеличение коэффициента усиления по мощности относительно типовых DpHEMT транзисторов на 6 дБ.



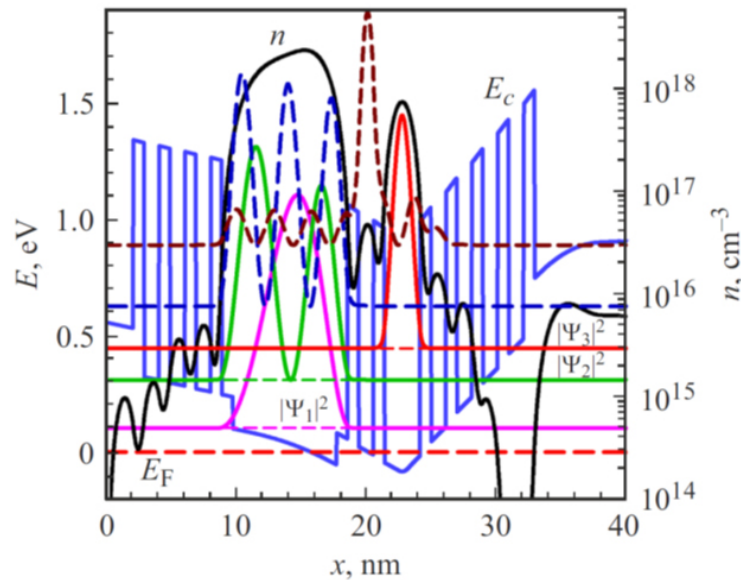
**Рисунок 1.** Зонная диаграмма, положение уровня Ферми и концентрационный профиль для Q-DpHEMT гетероструктуры.

## 3. Обращенная гетероструктура с донорно–акцепторным легированием и дополнительными цифровыми потенциальными барьерами

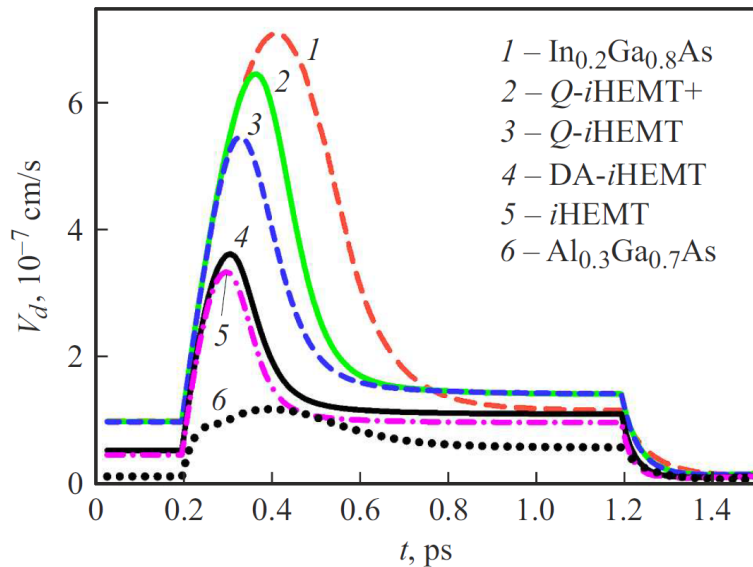
Теоретически исследованы характеристики перспективных для мм-диапазона длин волн обращенных транзисторных гетероструктур с донорно-акцепторным легированием и дополнительными цифровыми потенциальными барьерами Q-iHEMT. Зонная диаграмма и распределения концентрации электронов в Q-iHEMT гетероструктуре при температуре электронного газа 1500 К приведены на рисунке 2.

Зависимости дрейфовой скорости электронов от времени при влете электронов в область сильного поля для Q-iHEMT гетероструктуры представлены на рисунке 3.

В результате теоретических исследований установлено [8], что рабочие частоты транзисторов на основе Q-iHEMT гетероструктур могут более чем в два раза превышать рабочие частоты обычных DrHEMT транзисторов при сохранении удельной выходной мощности и по ряду параметров могут составить конкуренцию приборам на основе нитрида галлия и транзисторам с каналом на основе  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с высоким молярным содержанием индия особенно в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн.



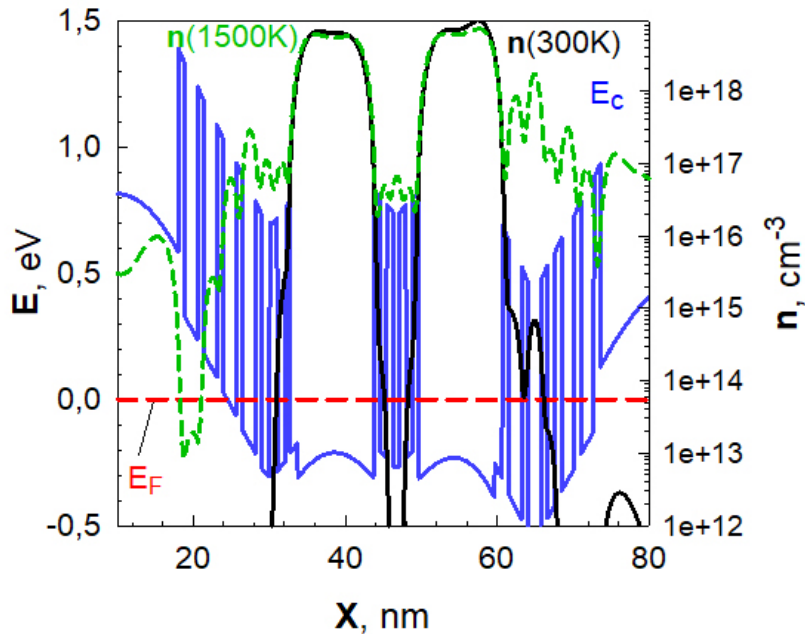
**Рисунок 2.** Зонная диаграмма и распределения концентрации электронов в Q-iHEMT гетероструктуре при температуре электронного газа 1500 К.



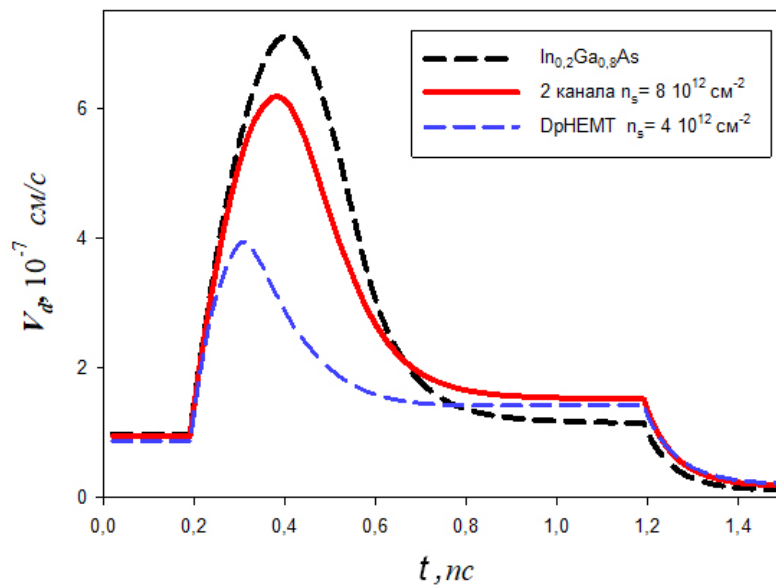
**Рисунок 3.** Зависимости дрейфовой скорости электронов от времени при влете электронов в область сильного поля ( $t < 0,2 \text{ ps}$ ,  $E = 1 \text{ кВ/см}$ ;  $0,2 \text{ ps} < t < 1,2 \text{ ps}$ ,  $E = 20 \text{ кВ/см}$ ;  $t > 1,2 \text{ ps}$ ,  $E = 1 \text{ кВ/см}$ ): iHEMT — обращенная структура; DA-iHEMT — обращенная структура с донорно-акцепторным легированием; Q-iHEMT — обращенная структура с донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами; Q-iHEMT+ — расчет с учетом локализованных состояний.

#### 4. Двухканальная гетероструктура с донорно-акцепторным легированием и дополнительными цифровыми потенциальными барьерами

Предложена и теоретически исследована конструкция двухканальной гетероструктуры с донорно – акцепторным легированием и дополнительными цифровыми потенциальными барьерами Q-DCrHEMT. Зонная диаграмма и распределения концентрации электронов в структуре с двумя каналами и цифровыми барьерами приведена на рисунке 4. Зависимости дрейфовой скорости электронов от времени при влёте электронов в область сильного поля для такой структуры показаны на рисунке 5.



**Рисунок 4.** Зонная диаграмма и распределения концентрации электронов в структуре с двумя каналами и цифровыми барьерами, температура электронного газа 300 К и 1500 К.



**Рисунок 5.** Зависимости дрейфовой скорости электронов от времени при влёте электронов в область сильного поля:  $t < 0,2$  пс,  $E = 1$  кВ/см;  $0,2$  пс  $< t < 1,2$  пс,  $E = 20$  кВ/см;  $t > 1,2$  пс,  $E = 1$  кВ/см.

Расчёты показали, что в такой гетероструктуре может быть достигнута поверхностная плотность электронов в канале  $8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , при этом всплеск дрейфовой скорости не сильно отличается от теоретического предела для данной модели – всплеска дрейфовой скорости в нелегированном объёмном материале канала. Это ведёт к возможности одновременного резкого увеличения выходной мощности и рабочих частот мощных полевых транзисторов на таких структурах.

## 5. Заключение

Таким образом, полученные результаты показывают, что использование цифровых барьеров в совокупности с донорно-акцепторным легированием является весьма эффективным способом улучшения характеристик псевдоморфных транзисторных гетероструктур на основе GaAs. Появляется возможность увеличения рабочих частот как минимум в 2 раза и соответственно коэффициента усиления в 4 раза относительно значений характерных для обычных ДрНЕМТ-транзисторов при сохранении неизменными высоких значений других параметров, например, удельной мощности. По теоретическим оценкам, удельные мощности транзисторов на гетероструктурах с двойным каналом Q-DCrНЕМТ могут достигать величин 3-4 Вт/мм, однако из-за тепловых эффектов без изменения их конструкции это возможно только в импульсных режимах.

### Список литературы

1. Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Журавлев К.С., Торопов А.И., Лапин В.Г., Соколов А.Б. Уменьшение роли поперечного пространственного переноса электронов и рост выходной мощности гетероструктурных полевых транзисторов // Письма в Журнал технической физики. – 2012. – Т.38. – №. 17. – с. 84-89.
2. Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Журавлев К.С., Торопов А.И., Лапин В.Г., Голант Е.И., Капралова А.А. Перспективы развития мощных полевых транзисторов на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием // Физика и Техника Полупроводников. – 2014. – Т. 48. – №. 5. – с. 684-692.
3. Борисов А.А., Пашковский А.Б., Лукашин В.М., Лапин В.Г., Щербаков С.В., Маковецкая А.А., Журавлев К.С., Торопов А.И. Анализ малосигнальных СВЧ характеристик DA-НЕМТ// Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. – 2016. – №1. – с. 65 – 69.
4. Богданов С.А., Карпов С.Н., Лапин В.Г., Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Рогачёв И.А., Терёшкин Е.В., Щербаков С.В., Бакаров А.К., Журавлёв К.С. DA-ДрНЕМТ миллиметрового диапазона длин волн// Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. – 2021. – № 2 (549). – С. 19-31
5. А.Б. Пашковский, С.А. Богданов, А.К. Бакаров, К.С. Журавлев, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, С.Н. Карпов, И.А. Рогачёв, Е.В. Терёшкин // Физика и Техника Полупроводников. – 2023. – Т.57. – Вып.1. – С. 21.
6. Богданов С.А., Бакаров А.К., Журавлёв К.С. Карпов С.Н., Лапин В.Г., Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Рогачёв И.А., Терёшкин Е.В. Перспективы улучшения быстродействия DA-ДрНЕМТ транзисторов миллиметрового диапазона длин волн // 31-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2021., 2021 г. с. 250-251.
7. A.V. Pashkovskii, S.A. Bogdanov, A.K. Bakarov, A.V. Grigorenko, K. S. Zhuravlev, V.G. Lapin, V.M. Lukashin, I.A. Rogachev, E.V. Tereshkin, S.V. Shcherbakov // IEEE Trans. On Electron Devices. – 2021. – Vol. 68. – № 1 – p.53.
8. А.Б. Пашковский, С.А. Богданов, А.К. Бакаров, К.С. Журавлев, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, С.Н. Карпов, Д.Ю. Протасов, И.А. Рогачёв, Е.В. Терёшкин. Всплеск дрейфовой скорости электронов в обращенных транзисторных гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием и дополнительными цифровыми потенциальными барьерами // Письма в Журнал технической физики. – 2022. – Т.48. – №. 12. – с. 11-14.